



Algorithmes pour l'analyse de la musique tonale

Mathieu Giraud, Marc Rigaudière

► To cite this version:

Mathieu Giraud, Marc Rigaudière. Algorithmes pour l'analyse de la musique tonale. Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série TSI: Technique et Science Informatiques, 2014, Informatique musicale, 33 (7-8), pp.567-586. 10.3166/tsi.33.567-586 . hal-01107721

HAL Id: hal-01107721

<https://hal.science/hal-01107721>

Submitted on 22 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Algorithmes pour l'analyse de la musique tonale

Mathieu Giraud¹, Marc Rigaudière²

1. Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (LIFL)

UMR 8022, CNRS, Université de Lille

Lille, France

mathieu@algomus.fr

2. Institut de recherche en musicologie (IReMus)

UMR 8223, CNRS, Université Paris-Sorbonne

Paris, France

marc.rigaudiere@paris-sorbonne.fr

RÉSUMÉ. Analyser une œuvre musicale, c'est éclairer certains aspects de sa composition et transformer son écoute. Cet article souhaite faire le point sur l'analyse par ordinateur de partitions de musique tonale. Nous commençons par replacer la pratique de l'analyse des formes musicales dans un cadre méthodologique, d'un point de vue musicologique. Nous passons en revue quelques travaux d'informatique musicale qui produisent des éléments d'analyse isolés – comme sur la mélodie, la thématique, l'harmonie et la texture – ainsi que d'autres études cherchant à synthétiser ces éléments dans une analyse globale. Enfin, nous réfléchissons sur les apports de l'analyse musicale automatisée à la musicologie comme à l'informatique musicale.

ABSTRACT. Analyze a musical piece means understanding some aspects of the score, ultimately changing one's own hearing. This paper reviews some works in the field of computational musical analysis of symbolic scores. We begin by presenting the analysis of musical forms in a musicological methodological framework. We then browse several studies in computer music that produce single analytical elements, like melody, patterns, harmonies or textures, as well as studies trying to gather these elements in a holistic analysis. We finally try to identify how useful is computational musical analysis for both fields of musicology and computer music.

MOTS-CLÉS : informatique musicale, analyse musicale, musicologie.

KEYWORDS: computer music, music analysis, musicology.

DOI:10.3166/TSI.33.567-586 © 2014 Lavoisier

1. Introduction

Analyser une œuvre musicale, c'est éclairer certains aspects de sa composition et transformer son écoute (Cook, 1987). Pour le mélomane, analyser de la musique se fait d'abord en suivant son intuition, sans connaissances particulières, ou bien en comparant différentes pièces d'un répertoire connu. L'analyse pratiquée par les musicologues, d'abord utilisée à des fins de pédagogie de la composition puis comme discipline autonome, s'appuie sur la possibilité de décomposer l'information musicale reçue globalement lors de l'écoute (ou de la lecture de la partition) en une somme d'informations partielles, souvent nommées « paramètres » par les musicologues, et que nous nommerons *éléments d'analyse* : tonalité et harmonie, mélodie, thématique, phraséologie, rythme, métrique, dynamique, instrumentation, texture, etc.

À plus grande échelle, l'analyse rassemble ces éléments dans une *forme*. Notre propos concerne l'analyse d'œuvres de la musique occidentale tonale (*Western tonal music*, appelée encore *common practice*), qui couvre les périodes baroque, classique et romantique, bien que les méthodes et outils peuvent être appliqués à d'autres musiques tonales (Tymoczko, 2011, *extended common practice*).

La recherche d'informations musicales (*music information retrieval*, MIR) est l'un des grands domaines de l'informatique musicale. Ce champ s'est développé les quinze dernières années, en partie en lien avec des intérêts commerciaux, comme par exemple, ceux liés aux questions de recherche ou de recommandation par le contenu. Cet article se focalise sur la recherche en analyse musicale par ordinateur (*computational music analysis*, CMA), recherche qui utilise certaines techniques de MIR, le plus souvent sur le *domaine symbolique*, c'est-à-dire sur des encodages formels de la partition. Traiter des données symboliques – principalement des hauteurs et des durées de notes – demande une expertise différente de celle utilisée en traitement du signal (Downie, 2008). On peut dire d'emblée que le musicologue aimerait retrouver dans un outil informatisé une partie de son propre comportement analytique. À la suite de plusieurs travaux comme (Anagnostopoulou, Buteau, 2010) ou (Marsden, 2009), nous pouvons identifier deux grands objectifs de ces recherches :

- produire des résultats musicologiques de manière automatisée ou semi-automatisée, éventuellement en bénéficiant de gains en temps de calcul ou en résolution (musicologie systématique) ;
- mener une réflexion sur nos disciplines, en questionnant, du point de vue du musicologue, la formalisation du procédé analytique, et, du point de vue de l'informaticien, la pertinence des modélisations et des algorithmes.

Le premier point, le plus technique, cherche à affiner *les résultats de l'analyse*, en essayant d'analyser des partitions comportant de vrais défis musicologiques. Le second point, sur la *démarche de l'analyse*, est tout aussi important. Célestin Deliége confiait : « L'analyse écrite se justifie principalement en fonction de l'explication d'une méthode ou d'une démonstration d'un phénomène spécifique. (...) Sauf dans le cas d'une œuvre nouvelle, quand je lis une analyse qui n'a d'autre but qu'elle-même,

je bâille d'ennui » (Deliège, 2005, p. 21). Ces propos s'appliquent aussi à l'analyse musicale par ordinateur : l'intérêt de ces recherches réside autant dans les aspects méthodologiques que dans les résultats produits.

Cet article souhaite faire le point sur l'analyse musicale par ordinateur, en combinant la réflexion de l'informaticien avec celle du musicologue et en prolongeant quelques contributions précédentes (Cook, 2005; Marsden, 2009; Anagnostopoulou, Buteau, 2010; Volk *et al.*, 2011). Nous commençons par replacer la pratique de l'analyse des formes musicales dans un cadre méthodologique, d'un point de vue musicologique (section 2). Nous décrivons quelques travaux réalisés en MIR/CMA qui, à partir d'une partition donnée sous forme symbolique, produisent des éléments d'analyse isolés, principalement sous l'angle de l'analyse motivique (section 3) ou qui cherchent à les synthétiser dans une analyse globale (section 4). Nous concluons sur les voies de recherches alliant musicologie et informatique.

Dans ce texte, nous présentons quelques *méthodes* d'analyse musicale automatique, mais nous ne détaillons pas les *logiciels* pour l'analyse musicale. Pour mentionner brièvement les outils existants dans le domaine, on peut tout d'abord évoquer les travaux pionniers autour du Morphoscope (Mesnage, 1993), boîte à outils au service d'une analyse manuelle. D'autres suites logicielles sont spécialisées dans l'analyse, comme Humdrum (Huron, 2002) (collection de scripts appelés en ligne de commande), MIDI Toolbox (Eerola, Toivainen, 2004) (bibliothèque Matlab), ou, plus récemment, music21 (Cuthbert, Ariza, 2010) (bibliothèque Python). De plus, certaines fonctionnalités analytiques sont présentes dans des logiciels qui sont aussi destinés à la composition, comme Rubato (Mazzola) ou OpenMusic (Bresson, Pérez-Sancho, 2012). Enfin, des outils comme iAnalyse sont spécialisés dans l'édition et la visualisation (Couprie, 2010).

2. Motivation musicologique et pratique de l'analyse musicale

Les motivations qui poussent un musicologue à pratiquer l'analyse musicale sont très diverses. L'analyse musicale est un outil parmi d'autres au sein de la musicologie et, selon la nature du projet initial, il lui sera demandé des réponses différentes, tout comme les méthodes mises en jeu seront également différentes. On peut analyser une œuvre pour dégager des grandes lignes esthétiques, pour caractériser un style, pour y rechercher une signification (herméneutique), pour observer des éléments systémiques (fonctionnement tonal par exemple), pour y repérer des principes de composition, pour alimenter l'histoire des formes, pour tester la validité d'une méthode, etc.

Dans toutes les manifestations de l'analyse, pourtant, un concept est central : celui de *forme* musicale. Il n'est guère d'analyse qui puisse l'évacuer, dès lors qu'on le prend au sens large, la forme étant alors comprise comme une façon unique d'assembler des éléments constitutifs, aboutissant à une œuvre unique. Dans son sens plus restrictif (la forme comme schéma), ce concept reste très présent dans la plupart des démarches analytiques. Il s'agit alors d'envisager une pièce comme un spécimen

d'une catégorie formelle, elle-même définie par l'observation de constantes au sein de corpus larges (Rigaudière, 2009).

De ce point de vue, l'analyste ressemble parfois au botaniste qui, pour situer une plante dans une classification, s'appuie sur un certain nombre de critères morphologiques. Cette remarque est particulièrement vraie de l'analyse en contexte académique. La comparaison ne peut guère être poussée davantage, car l'objet que le musicologue observe est une œuvre d'art, et non un produit de la nature. La démarche qui intervient alors n'est pas une démarche scientifique stricte : elle allie, en des proportions variables, la raison et la sensibilité. L'œuvre musicale est d'autant moins justiciable d'une taxinomie parfaitement rigoureuse qu'elle n'est pas élaborée selon des procédures parfaitement formalisables et reproductibles.

Malgré tous ses efforts pour forger des outils rationnels, l'analyse musicale est donc contrainte à un empirisme certain. L'observation de corpus larges permet d'établir des constantes propres aux genres et aux « formes », mais chaque nouvelle analyse est susceptible, en venant allonger la liste des exceptions et des cas particuliers, de démontrer la fragilité des catégories formelles. Un consensus tacite existe sur le fait que la systématique des formes, pour être de quelque utilité, doit en rester à un certain degré de généralité et de souplesse. On doit bien distinguer, parmi les nombreuses études des formes existantes, celles qui ont été produites dans le cadre de la pédagogie de la composition, où l'effort est orienté vers une certaine normativité (donner des patrons qui doivent pouvoir être appliqués pour composer de nouvelles œuvres, comme, par exemple, pour la forme sonate, (Marx, 1838, 1845) où (Czerny, 1848)), et celles, plus tardives, qui sont détachées de contraintes de composition (comme, pour la forme sonate, (Rosen, 1980) ou (Hepokoski, Warren, 2006)). Ces dernières sont a priori plus neutres : elles cherchent à décrire l'existant, non à ériger des normes.

Quelle que soit la façon de le formaliser, les études modernes de la forme musicale enregistrent toutes l'idée que la forme résulte d'une interaction entre différents *éléments*. Toutefois, les relations entre ces éléments ne peuvent pas être établies d'une façon constante. La façon de les hiérarchiser est historiquement variable : on est passé globalement de descriptions accordant une priorité aux éléments phraséologique et thématique, à d'autres où l'élément tonal a été revalorisé (Rigaudière, 2012). Indépendamment de ce facteur de variabilité à l'échelle historique, certains éléments peuvent s'avérer plus ou moins déterminants selon les cas : articulation phraséologique du flux musical, tonalité/harmonie, construction thématique, texture, présence structurante d'un texte littéraire, etc. La pertinence d'une analyse dépend donc de sa capacité à mettre en relation les éléments jugés significatifs pour une œuvre donnée.

Dans la réalité du processus analytique, pourtant, il n'y a pas une somme de lectures linéaires et stratifiées dont chacune serait limitée à un seul élément, mais une lecture synthétique (souvent guidée par l'écoute ou l'exécution de la pièce) susceptible d'une part de se focaliser tour à tour sur l'un ou l'autre aspect du texte musical et, d'autre part, de rassembler le fruit de cette lecture discontinue en une image globale. C'est bien un point essentiel de l'analyse musicale : ce qu'on nomme analyse est en fait un double mouvement d'*analyse* suivi d'une *synthèse*, mouvement que nous

suivrons dans les deux prochaines sections consacrées à l'analyse algorithmique. Ce travail se fait en outre dans le contexte de connaissances historiques sur les styles et sur les genres.

3. Analyse informatique d'éléments musicaux

3.1. De la partition à l'analyse

La partition est une représentation codée de l'œuvre musicale impliquant certaines conventions. L'informaticien utilise des codages qui, parfois, réduisent l'information : les fichiers MIDI, MusicXML ou ****kern** (Huron, 2002) n'ont pas tous la même précision de description.

Les fichiers MIDI, initialement destinés à la communication entre instruments ou autres appareils électroniques, représentent la hauteur (mesurée en demi-tons) et la durée des notes. Ils peuvent indiquer les différentes voix sur différents *canaux* – mais de nombreux fichiers sont encodés sur un unique canal. De plus, certains fichiers sont correctement *quantifiés*, c'est-à-dire avec des durées qui peuvent être facilement ramenées à des valeurs entières ou rationnelles. D'autres éléments des partitions (expression, dynamique...) peuvent être représentés, mais il n'y a pas de consensus sur leur encodage. Les fichiers MusicXML ou ****kern** sont eux plus proches de la partition. Ils permettent surtout de préciser les hauteurs *diatoniques* : bien qu'ils correspondent à la même hauteur, le *sol dièse* est formellement différent du *la bémol*, et, dans un cadre tonal, ces deux notes ont des fonctions différentes. De plus, ces fichiers spécifient les durées suivant la notation musicale traditionnelle et permettent aussi de coder d'autres éléments de notation. Le format ****kern**, destiné à l'analyse musicologique, permet de plus d'encoder dans certains canaux des résultats d'analyse. Le format MusicXML a lui été conçu comme format d'échange entre éditeurs de partition. Il permet de décrire fidèlement une représentation visuelle de la partition, y compris certains choix typographiques.

À partir de la partition modélisée informatiquement, les algorithmes essaient de produire automatiquement certains *éléments d'analyse*. Ce que l'analyste lit dans la partition doit ici être systématisé et quantifié. Certaines notions s'y prêtent facilement, au moins pour les cas simples : une phrase a généralement un début et une fin, une section peut s'inscrire clairement dans une tonalité, et l'œuvre est généralement structurée par des marqueurs formels comme des cadences. D'autres notions sont par nature plus difficiles à quantifier (tension, texture...) et ne pourront être intégrée à l'analyse que par des réductions quantifiées. Toute approche algorithmique doit donc traduire des concepts subjectifs en modélisations précises (Marsden, 2009). Les paragraphes qui suivent présentent quelques méthodes automatisées produisant des éléments d'analyse, principalement des *motifs* mais aussi d'autres éléments tels que l'harmonie ou la texture.

3.2. Analyse motivique

Un *motif* est une unité minimale utilisée dans la composition, qui acquiert un statut particulier par son retour exact ou transformé. Sa prégnance, c'est-à-dire sa faculté de marquer la mémoire, lui est conférée par des facteurs agissant le plus souvent en combinaison : intervalles, contour mélodique, rythme, harmonie. Un motif est souvent présenté initialement au sein d'une unité plus longue et close, le thème.

L'analyse motivique révèle la répétition de tels motifs, éventuellement transformés, tout au long de la pièce. Une analyse motivique doit à la fois estimer les bornes de motifs saillants, détailler leurs occurrences et décrire leur transformation. Une telle analyse est dite « paradigmatic » lorsqu'elle implique une réécriture de la partition dans laquelle les segments considérés comme équivalents d'un point de vue motivique sont alignés verticalement (Nattiez, 1975).

3.2.1. Segmentation locale et bornes des motifs

Le premier problème d'une analyse motivique est d'identifier les bornes d'un motif. Dans un contexte monodique, on peut d'abord utiliser une approche locale, par exemple en observant les différences entre intervalles successifs ou bien entre les durées successives : ce n'est pas seulement une grande durée ou un grand intervalle qui marque la fin d'une phrase, mais la variation de ces quantités. Le travail de référence dans ce domaine est l'algorithme LBDM (*Local Boundary Detection Model*) (Cambouropoulos, 2001), qui obtient de bons résultats tout en restant simple. Il se base sur les différences (prises en valeur absolue) avec l'intervalle précédent et suivant ainsi que la valeur absolue de chaque intervalle. L'algorithme considère ainsi les intervalles mélodiques, les durées, ainsi que les silences.

3.2.2. Motifs répétés et occurrences

Une approche plus globale sélectionnera les motifs donnant l'ensemble d'occurrences le plus satisfaisant (Hsu *et al.*, 1998). Les répétitions des différentes occurrences ont une grande importance sur la perception du début d'un motif (Cambouropoulos, 2006). Certaines techniques de détection de motifs combinent ces aspects locaux et globaux (Meek, Birmingham, 2003).

Lartillot (2002, 2007) a développé une approche originale d'extraction de motifs. La description de ces motifs peut prendre des valeurs dans plusieurs dimensions. Ainsi, un motif peut prendre la forme *ré noire*, *croche*, *croche*, *sol noire*, la hauteur des deux croches n'étant pas spécifiée. Cette approche permet de construire un ensemble de motifs incluant un grand nombre de paramètres (hauteurs relatives ou absolues, diatoniques ou chromatiques, durées, métrique mais aussi potentiellement accentuation, fonctions harmoniques...) Pour être significatif, un motif "fermé" doit se répéter au moins deux fois, et être le plus spécifique possible vis-à-vis de ces occurrences (figure 1).

3.2.3. *Motifs et strates polyphoniques*

Dans une texture polyphonique, la notion même de motif est plus complexe. Certaines études partent de polyphonies où les voix sont séparées. Il a été ainsi proposé d'extraire des motifs contrapuntiques élémentaires, c'est-à-dire des motifs présentant localement l'agencement de voix mélodiques distinctes. Ces motifs tiennent compte de la conduite des voix tout comme de relations de consonance et de dissonance (Conklin, Bergeron, 2010) (figure 2).

De nombreuses textures pour piano ou pour d'autres instruments polyphoniques ne peuvent se décomposer convenablement en voix distinctes. Inversement, le jeu d'un instrument monophonique peut faire apparaître plusieurs strates. Pour regrouper horizontalement (au cours du temps) et verticalement (dans l'espace des hauteurs) des strates appartenant à un même tissu musical, Rafailidis *et al.* (2008) ont proposé d'utiliser un clustering en k plus proches voisins à partir de critères de groupement (figure 3).

3.2.4. *Évaluation des motifs*

Qu'ils soient monophoniques ou polyphoniques, les motifs peuvent être évalués statistiquement. Darell Conklin propose d'estimer la pertinence de motifs par un rapport de fréquences d'apparition, un motif « distinctif » étant un motif surreprésenté dans un corpus par rapport à un anti-corpus (Conklin, 2010).

3.2.5. *Occurrences et similarités approchées*

Un élément thématique n'est pas toujours stable au cours de l'œuvre, mais sera pourtant reconnu par l'auditeur. Si sa présence entière n'est pas nécessaire, cela signifie que l'identité d'un élément thématique peut résider dans des traits caractéristiques minimaux. On cherche ainsi à détecter une similarité entre plusieurs segments de la partition, que cela soit pour identifier l'énoncé d'un motif ou ses occurrences suivantes. Dans le cas de la monodie, la similarité entre deux séquences de notes peut être estimée par l'algorithme de Mongeau-Sankoff (Mongeau, Sankoff, 1990) et ses extensions. Ces algorithmes, provenant en partie de l'algorithmique du texte et de la bio-informatique (Gusfield, 1997), calculent la *distance d'édition*, c'est-à-dire le nombre d'opérations nécessaires pour transformer un motif dans sa formulation initiale en une de ses variantes.

Les opérations d'édition habituelles sont l'identité, les remplacements, les insertions et suppressions, les consolidations et les fragmentations. Cependant, insérer ou supprimer des notes, ou même substituer un rythme, détruit généralement la perception des temps et de la mesure. Les opérations de fragmentation et de consolidation sont plus appropriées pour transformer un motif en un autre (Mongeau, Sankoff, 1990; Giraud, Cambouropoulos, 2013) (figure 4). D'autres méthodes de recherche approximatives ont été proposées (Clifford, Iliopoulos, 2004; Crawford *et al.*, 1998), y compris pour des séquences polyphoniques (Allali *et al.*, 2009). Ces méthodes doivent

The figure shows a musical score for J.S. Bach's Invention for two voices BWV 775. The score is in 3/8 time and features two staves. Motifs are identified by letters (A, B, C, D, E) and specific notes (a1, b, c, a2, b', a3, b'', a4, D). The motifs are connected by lines indicating their transformations throughout the piece.

Figure 1. Analyse motivique de l'invention à deux voix BWV 775 de J.-S. Bach (Lartillot, 2007). Chacun des motifs est identifié par une lettre, et les motifs sont reliés entre eux par un "graphe syntagmatique" décrivant des relations de spécificité. Par exemple, le motif b, "ré mi fa" en doubles-croches, se transforme en b' (motif transposé exactement) puis b'' ("do ré mi" et "fa sol la", transposition diatonique)

encore être complétées : les traits caractéristiques d'un élément thématique sont parfois difficiles à retrouver lorsqu'on utilise les opérations usuelles d'édition. Pour cela, de meilleures opérations d'édition devraient être imaginées, permettant de décrire de manière plus musicale les transformations successives d'un même motif.

Enfin, certaines méthodes de similarité musicale ne sont pas basées sur la distance d'édition (Ahlbäck, 2007; Conklin, Anagnostopoulou, 2006). Les méthodes géométriques permettent en particulier de chercher des motifs à une transposition près (Typke, 2007; Ukkonen *et al.*, 2003).

Figure 2. Détection de « motifs contrapuntiques » élémentaires dans un corpus de 185 chorals de J.-S. Bach (extrait de Conklin, 2010). Les trois motifs retenus sont « distinctifs » du couple SB (soprane/basse). Pour chacun des trois motifs, deux occurrences sont détaillées. Les motifs intègrent des relations de consonnance (unissons, tierces et sixtes majeures et mineurs, quinte) ou dissonance (autres intervalles) ainsi que de simultanéité ou de succession temporelle. Par exemple, le premier motif, pouvant faire intervenir une dissonance sur une partie faible de temps (note marquée par d), apparaît cinq fois plus souvent dans le couple SB que dans les autres ensembles de voix

3.3. Autres éléments d'analyse

3.3.1. Harmonie

L'analyse *harmonique* a suscité de nombreux travaux d'informatique musicale. Les algorithmes de détection de tonalité locale (Holtzman, 1977; Krumhansl, Kessler, 1982; Temperley, 1999) estiment la tonalité la plus probable pour chaque segment de la pièce en considérant les hauteurs de notes. La détection d'accord peut notamment se réaliser suite à une segmentation harmonique de la partition (Pardo, Birmingham, 2002). Des travaux plus récents ont pris aussi en compte la distribution des intervalles (Madsen, Widmer, 2007) ou la combinaison de méthodes (Robine *et al.*, 2008).

Détecter les tonalités locales est un premier pas vers une analyse fonctionnelle, précisant les degrés et fonctions de chaque accord (Illescas *et al.*, 2007; Passos *et al.*, 2009) et incluant éventuellement une détection de cadences. Si la détection de tona-

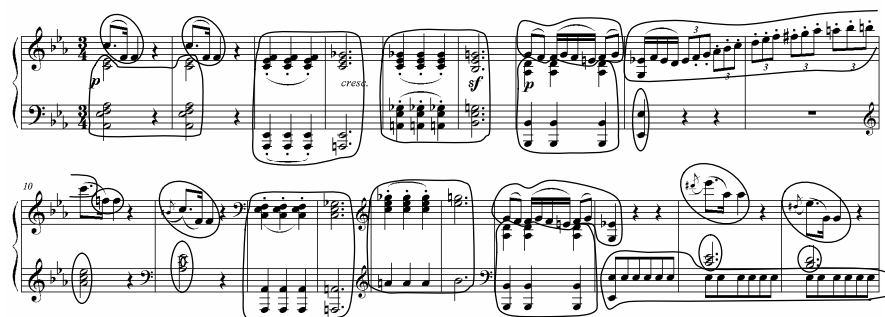


Figure 3. Détection de strates polyphoniques dans l'introduction de la sonate op. 31 n° 3 de Beethoven (Rafailidis, 2008). Cette analyse automatique reprend certains critères de groupement de (Deutsch, 1982, chapitre 6). Les groupes favorisent des notes synchrones, et, pour des notes successives, celles étant à hauteurs proches. Dans les deux premières mesures, cette détection réussit à séparer la mélodie (haut de la main droite) de l'accompagnement (accords en blanches, répartis sur les deux mains). Dans les deux toutes dernières mesures, l'algorithme propose, avec raison, trois strates, une de mélodie et deux d'accompagnement

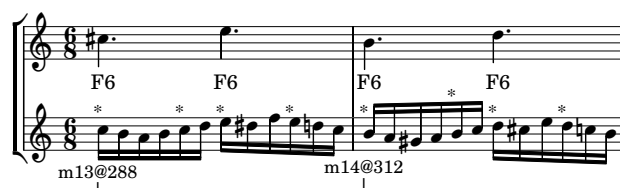


Figure 4. Fragmentation entre le thème et la variation mineure de l'Andante grazioso de la sonate pour piano numéro 11 de Mozart (K 331). La texture de la variation (en bas) peut se voir comme une fragmentation à parti d'une réduction du thème (en haut). De plus, les notes sont placées à des positions similaires dans les mesures, ce qui permet un test simple de parallélisme (Giraud, 2013)

lité locale réussit généralement, les bornes précises de ces tonalités sont souvent mal estimées, les notes modulantes n'étant pas précisément identifiées. L'analyse harmonique peut aussi s'appuyer sur un espace des hauteurs (Andreatta, 2009), que cela soit sur des modélisations de la tonalité inventées au cours du dix-neuvième siècle (Rigaudière, 2009) ou aussi sur des théories plus récentes, incluant les acquis de la *pitch-class set theory*, comme avec les formalisations de Tymoczko (2011).

3.3.2. Rythme et mètre

Certains travaux ont modélisé la *structure rythmique et métrique* de partitions, comme par exemple (Temperley, 2001, chapitre 2), en reprenant certains concepts de

la *Generative Theory of Tonal Music* (GTTM) (Lerdhal, Jackendoff, 1983), ou, plus récemment d'autres approches (Toussaint, 2010) et (Janin, 2012).

3.3.3. Texture

On différencie habituellement les textures *homophoniques* (voix ou rythmiques similaires) et les textures *polyphoniques* (plusieurs strates, le plus souvent une mélodie avec un accompagnement, mais aussi contrepoint). La notion de texture recouvre aussi des aspects de densité (nombre de voix, degré d'intrication des voix par le rythme et les registres). On pourrait imaginer, par exemple, de réduire la notion de texture à une densité formulée en nombre de sons présents à un moment donné, ou encore à un nombre de voix de polyphonie qu'il est possible d'isoler à un moment donné. Nordgren (1960) propose d'utiliser d'autres critères, comme la répartition verticale des accords, en tenant compte de la présence éventuelle de vides et du registre de ceux-ci, le nombre de doublures ou le nombre d'instruments présents.

David Huron modélise la texture en considérant deux paramètres, la synchronisation des notes et la présence de mouvements parallèles (Huron, 1989). Il parvient ainsi à reconnaître quatre types de texture : monophonie, homophonie, polyphonie et hétérophonie, et à classifier certains styles de musique.

Nous avons proposé de formaliser la texture comme ensemble de strates (Giraud *et al.*, 2014). À l'intérieur de ces strates, les voix peuvent avoir plusieurs types de relations (du moins au plus contraignant, *h*, homorythmie, *p*, mouvement parallèle, *o*, octave, *u*, unisson) Nous avons conçu un algorithme de détection de passages homorythmiques (éventuellement avec des contraintes supplémentaires *p/o/u*) à l'intérieur d'une polyphonie non séparée en voix. En évaluant cet algorithme contre une analyse manuelle de dix mouvements de quatuor à cordes (Mozart, Haydn), nous retrouvons plus de la moitié des mouvements parallèles indiquées avec une précision de plus de 80%. D'autres types de textures devraient être recherchées pour améliorer ces analyses.

4. Synthèse informatique d'éléments analytiques

Si l'on trouve beaucoup de travaux en informatique musicale qui analysent certains aspects de la partition, peu de recherches tentent de produire des analyses complètes. Comment une analyse algorithmique peut-elle synthétiser les différents éléments présentés dans la section précédente ? Le but n'est alors pas seulement de découper la partition en un certain nombre d'unités musicalement significantes, mais de proposer une interprétation analytique de l'ensemble de la pièce, notamment par une analyse de la forme.

Dans la plupart des cas, les strates d'éléments analytiques seront concordantes. Il faudra quelquefois accorder la préférence à l'un des éléments si elles sont contradictoires. Faire une analyse musicalement pertinente demande donc de faire des *choix*

analytiques. Comment automatiser ce choix en l'absence de critères de priorité applicables d'une façon homogène ?

Dans quelques situations, des règles de préférence, résultant de l'expertise, peuvent être satisfaisantes. En général, on utilisera des approches probabilistes, comme des modèles de Markov cachés (Sargent *et al.*, 2011) ou des modèles bayésiens (Temperley, 2007), couplées à un apprentissage des paramètres de ces modèles. Ces modèles probabilistes peuvent produire de bons résultats, mais ils fonctionnent comme des « boîtes noires » qui risquent de masquer les arguments analytiques (Marsden, 2009). Toutefois, même dans une approche probabiliste, la conception de bons modèles demande une expertise musicologique.

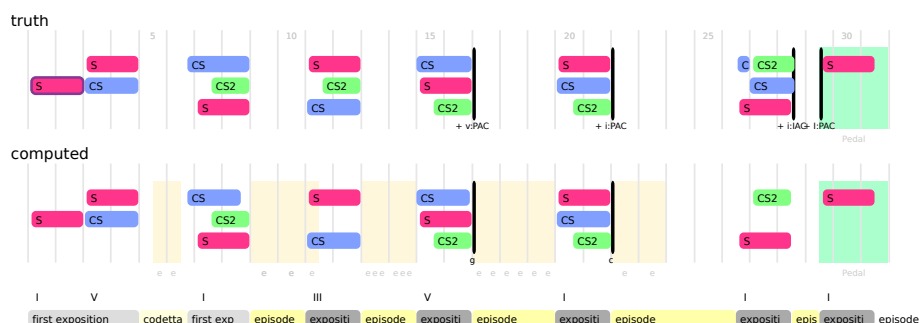


Figure 5. Analyse de la fugue BWV 847, de J.-S. Bach, avec identification de motifs thématiques, de marches harmoniques, de cadences (traits noirs) et détection d'une structure d'ensemble (Giraud, 2012). L'analyse obtenue (en bas) est comparée avec une analyse de référence (en haut). Dans cet exemple, les sujets et les deux contre-sujets sont parfaitement retrouvés, excepté une occurrence d'un contre-sujet répartie entre plusieurs voix (mesures 26 à 28). La structure d'ensemble, prédite par un modèle de Markov, est correctement calculée. <http://algonus.fr/fugues>

4.1. Analyse synthétique guidée par la connaissance de formes musicales

4.1.1. Fugues

Weng et Chen (2005) ont essayé d'identifier certaines formes (fugue, rondo), mais sans analyse détaillée. D'autres études tentent de produire une analyse complète comme par exemple dans le cas des fugues (Browles, 2005). Nous avons proposé un pipeline complet d'annotation des fugues (Giraud *et al.*, 2015, sous presse), testé sur les 24 fugues du premier livre du *Clavier bien tempéré* de Bach et les 12 premières fugues de l'opus 87 de Shostakovitch. Le pipeline utilise les étapes suivantes :

- choix de la note de fin des sujets (succès dans 64 % des cas) et des contre-sujets, par comparaison des motifs potentiels avec l'ensemble des occurrences dans la partition ;

- détection des occurrences des sujets et contre-sujets (avec plus de 80 % de sensibilité et de précision), par comparaison approchée sur les hauteurs diatoniques, et avec une recherche exacte des durées, excepté sur la première note et la dernière note ;
- recherche de marches harmoniques, détectées à partir de trois occurrences successives d'un motif diatonique sur toutes les voix. Les marches harmoniques sont un des marqueurs des épisodes (plus de 40 % des épisodes des fugues de Bach sont composés de telles marches harmoniques) ;
- détection des cadences (fins de phrases musicales), des pédales (notes maintenues alors que plusieurs accords s'enchaînent), et des degrés des occurrences des sujets.

Enfin, nous utilisons un modèle de Markov pour rassembler une partie de ces éléments dans une segmentation (figure 5). Une évaluation subjective du résultat sur les 36 fugues a jugé 17 analyses comme “bonnes”, 12 “correctes” et 7 “mauvaises”.

4.1.2. *Formes sonates*

(David *et al.*, 2014) présente un travail préliminaire sur les formes sonates. Cette forme est bâtie sur deux zones thématiques (principale, P, et secondaire, S) mais surtout sur un *plan tonal* sur l'ensemble de la pièce. L'analyse d'une forme sonate demande donc de combiner des aspects locaux (motif et thèmes, cadences...) avec des aspects globaux (plan tonal, structure d'ensemble). Le premier défi est dans la *détection de la structure générale* : couple exposition/réexposition, avec des marqueurs précis lorsqu'ils existent, formant la structure tonale à grande échelle.

Après une identification de fins de phrases, nous avons tenté une première approche de détection des zones P et S : recherche de la zone P du départ à une fin de phrase, sans transposition, puis recherche de la zone S sous la contrainte d'une transposition depuis la dominante. Cela permet de retrouver le couple exposition/réexposition, mais la zone S prédite peut être détectée en amont de la zone réelle S, la fin de la transition entre P et S étant déjà transposée à la dominante dans l'exposition (figure 6). Un objectif serait d'identifier précisément (lorsque c'est possible) la fin du premier thème et le début du second, en s'appuyant sur la *césure médiane*, lorsqu'elle existe (Hepokoski, Warren, 2006).

4.1.3. *Retour à l'analyse motivique*

Enfin, notons que la connaissance d'une forme d'ensemble peut guider une nouvelle analyse motivique, plus précise : ainsi, dans les fugues, des occurrences approchées des sujets et contre-sujets ne seront pas traitées de la même manière dans les parties d'exposition et dans les divertissements.

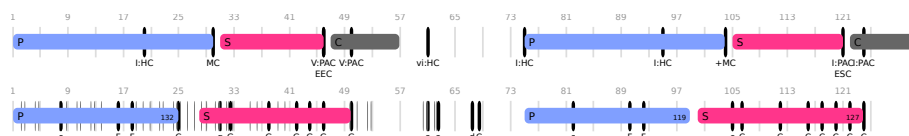


Figure 6. Recherche du couple exposition/réexposition dans le premier mouvement du quatuor à cordes K. 157 n° 4 de W. A. Mozart (David, 2014). Le schéma du haut montre une analyse possible (faite par nos soins) avec cadences et marqueurs structurels en utilisant les notations de Hepokoski et Warren (2006). Le schéma du bas représente ce qui est trouvé par le programme. Les traits fins verticaux dans l'exposition montrent des fins de phrases potentielles, et les traits gras des cadences potentielles (majuscule : majeur, minuscule : mineur)

4.2. Analyses synthétiques sans a priori de forme

En situation réelle, l'analyse d'une oeuvre inconnue ne s'appuie généralement pas sur une forme donnée – mais idéalement, elle part d'une connaissance implicite de l'ensemble des formes existantes. Le but est alors de réaliser directement une analyse à grande échelle, sans a priori de forme. La forme convenant aux données d'entrée, pièce ou ensemble de pièces, sera éventuellement inférée.

Une telle inférence de structure pose de grandes difficultés combinatoires. En conséquence, certains travaux s'inscrivent dans un contexte d'analyse manuelle (ou semi-automatique) plutôt que dans des approches totalement algorithmisées : les méthodes informatiques sont alors utilisées comme des outils au service d'un expert, et c'est plus le résultat de l'analyse qui est ici recherché. Les nombreuses modélisations de Marcel Mesnage et d'André Riotte (Mesnage, Riotte, 2006) sont parmi les précurseurs du domaine. Certaines modélisations par grammaires ou automates peuvent aller jusqu'à la composition automatique (Cope, 1991; Chemillier, 2004). Des études ont tenté de modéliser l'attente musicale (Temperley, 2001, chapitre 8) ou la tension tonale (Lerdahl, Krumhansl, 2007).

Les travaux d'Alan Marsden (Marsden, 2010) proposent de s'approcher automatiquement d'une analyse schenkérienne¹, par des réductions successives d'une partition monophonique. Au Japon, une équipe essaie d'automatiser directement les modèles de la GTTM en implémentant des règles de groupement préférentielles (Hamanaka *et al.*, 2007). Leur modèle se limite pour l'instant à l'analyse de thèmes. Algorithmiser ce type de modèles demande de faire face à des choix analytiques et à une explosion combinatoire du nombre de dérivations possibles. Là encore, une possibilité est de concevoir des analyses assistées par ordinateur (Hamanaka, Tojo, 2009) (figure 7).

1. L'analyse schenkérienne repose sur le principe de la réduction progressive des éléments mélodiques et harmoniques observables directement dans la partition, considérés comme des éléments de la « surface » musicale. Cette réduction par réécriture est opérée dans le but de mettre à jour les structures sous-jacentes auxquelles les éléments de surface se rattachent à des niveaux hiérarchiques plus élevés (Schenker, 1935).

Ces travaux donnent des pistes pour de futurs modèles plus automatisés analysant l'ensemble d'une partition.

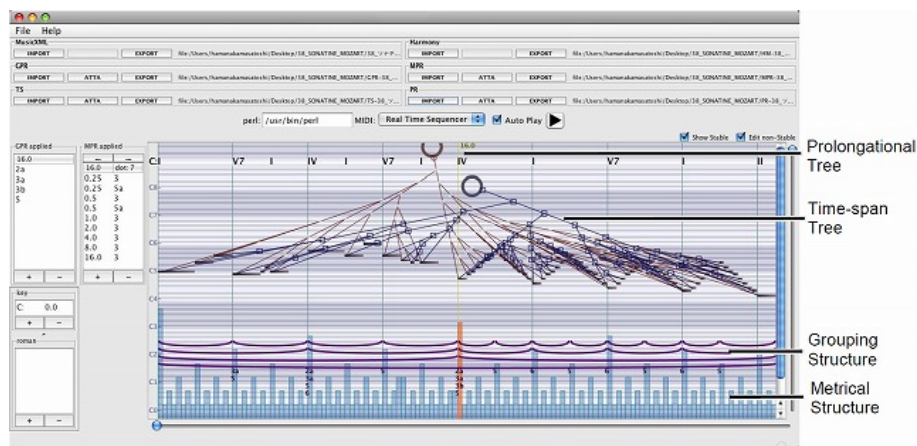


Figure 7. Analyseur interactif GTTM (Hamanaka, 2009), permettant une analyse assistée par ordinateur. Trois cents phrases musicales ont été analysées de manière semi-automatique par cette méthode

<http://music.iit.tsukuba.ac.jp/hamanaka/gttm.htm>

4.3. Perspectives pour l'analyse synthétique

Que cela soit dans l'analyse de formes connues ou dans celle utilisant des principes schenkériens, nous ne sommes qu'au début des recherches dans ce domaine de l'informatique musicale. Nous rejoignons l'affirmation de Anja Volk et de ses collègues (Volk *et al.*, 2011) :

The integration of isolated components of music into a holistic model of musical structure through computational modelling is a challenge for future research.

Analyser correctement une forme musicale, même simple, reste un défi de modélisation et de calcul. En particulier, comment des méthodes algorithmiques traitent-elles les sections instables, c'est-à-dire dans lesquelles la tonalité est mouvante, l'harmonie souvent chromatique, et le flux musical très continu ? En musicologie, l'étude des formes a traditionnellement concentré ses efforts sur les sections les plus stables : elle décrit mieux l'exposition d'une forme sonate que son développement. De même, de nombreuses pièces du romantisme tardif défient l'analyse par des fonctions formelles moins tranchées, et par une continuité plus grande du tissu. L'analyse algorithmique sera-t-elle opérationnelle en l'absence de sections bien isolées, dont les fonctions formelles sont clairement caractérisées (énoncé, réénoncé, transition, conclusion, etc.) ? Plus généralement, son champ d'action ne sera-t-il pas limité aux formes les plus facilement lisibles ?

Les structures sur lesquelles reposent l'intelligibilité de la forme admettent un certain taux d'irrégularité, et ce précisément par ce que les modèles auxquels on se réfère ne sont pas des normes mais des abstractions conceptuelles ou statistiques. Pour chaque analyse automatique qu'on estimera « fausse », il faudra donc définir une nouvelle loi de tolérance, ou du moins, nous interroger sur la validité de la « règle » de départ et revisiter les modèles musicologiques comme informatiques.

5. Conclusion

La première réaction d'un musicologue confronté à l'idée d'une analyse automatisée sera très probablement sceptique : il est difficile d'imaginer qu'une démarche que l'on sait empirique par essence puisse donner lieu à un processus parfaitement systématique et rigoureux. C'est sans doute ici que se trouve l'essentiel de l'enjeu d'un projet d'analyse informatisée, tant pour l'informaticien que pour le musicologue. Pour le premier, il s'agit de concevoir des algorithmes capables de « souplesse » (occurrences approchées, possibilités d'ambiguïtés...) tout en pouvant faire des choix analytiques pertinents. Pour le second, il s'agit de rationaliser autant que possible des opérations qui sont souvent tacites et approximatives dans le processus d'analyse.

Une analyse complètement automatisée donne pour l'instant des résultats très inférieurs à ce que font les musiciens. L'analyse semi-automatisée, où l'expert suggère des pistes ou corrige certaines décisions du logiciel, se présente comme une perspective prometteuse au service de l'analyste ou du compositeur. Dans tous les cas, l'analyse musicale par ordinateur est une activité nécessitant des collaborations entre disciplines. Pour se développer, ce champ aura vraisemblablement besoin de chercheurs mieux formés aux deux domaines (Cook, 2005; Marsden, 2009). Enfin, dans tous ces travaux, les questions d'évaluation sont primordiales : comment estimer la qualité d'un algorithme ? Il est indispensable de disposer de *corpus* avec des analyses de référence, modélisées sous forme informatique. Ces analyses devraient aussi inclure des solutions alternatives lorsque les éléments d'analyse ou bien les formes sont instables ou ambiguës.

Ces recherches stimulent l'informatique musicale, soulevant des questions de modélisation et d'algorithmique, que cela soit dans la production d'éléments d'analyse isolés ou dans celle de synthèses. Elles posent aussi de nouvelles questions à la musicologie. Quels sont les critères irréductibles par lesquels on identifie les sections formelles dans une pièce ? Peut-on établir le plan tonal d'une œuvre en localisant avec exactitude les plages tonales ? Jusqu'où une structure musicale peut-elle rester cohérente et intelligible si les signaux attendus sont manquants ?

Remerciements

Nous remercions les relecteurs pour leurs nombreuses remarques pertinentes sur une première version de cet article, ainsi que Jean Bresson pour son travail éditorial. Ces recherches ont bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme "Investissement d'avenir" portant la référence ANR-11-EQPX-0023.

Bibliographie

- Ahlbäck S. (2007). Melodic similarity as a determinant of melody structure. *Musicae Scientiae*, vol. Discussion Forum 4A, p. 235–280.
- Allali J., Ferraro P., Hanna P., Iliopoulos C., Robine M. (2009). Toward a general framework for polyphonic comparison. *Fundamenta Informaticae*, vol. 97, p. 331–346.
- Anagnostopoulou C., Buteau C. (2010). Can computational music analysis be both musical and computational? *Journal of Mathematics and Music*, vol. 4, n° 2, p. 75–83.
- Andreatta M. (2009). Calcul algébrique et calcul catégoriel en musique : aspects théoriques et informatiques. In *Le calcul de la musique, composition, modèles et outils*. AFIM, Publications de l'Univ. de Saint-Étienne.
- Bresson J., Pérez-Sancho C. (2012). New framework for score segmentation and analysis in OpenMusic. In *Sound and music computing conference (SMC 2012)*, p. 506–513.
- Browles L. (2005). *Creating a tool to analyse contrapuntal music*. Bachelor Dissertation, Univ. of Bristol.
- Cambouropoulos E. (2001). The local boundary detection model (LBDM) and its application in the study of expressive timing. In *International computer music conference (ICMC 2001)*.
- Cambouropoulos E. (2006). Musical parallelism and melodic segmentation. *Music Perception*, vol. 23, n° 3, p. 249–268.
- Chemillier M. (2004). Grammaires, automates et musique. In *Informatique musicale*, p. 195–230. Hermès, Lavoisier.
- Clifford R., Iliopoulos C. S. (2004). Approximate string matching for music analysis. *Soft. Comput.*, vol. 8, n° 9, p. 597–603.
- Conklin D. (2010). Discovery of distinctive patterns in music. *Intell. Data Anal.*, vol. 14, n° 5, p. 547–554.
- Conklin D., Anagnostopoulou C. (2006). Segmental pattern discovery in music. *INFORMS Journal on Computing*, vol. 18, n° 3.
- Conklin D., Bergeron M. (2010). Discovery of contrapuntal patterns. In *International society for music information retrieval conference (ISMIR 2010)*, p. 201–206.
- Cook N. (1987). *A guide to musical analysis*. Dent.
- Cook N. (2005). Towards the complete musicologist. In *International conference on music information retrieval (ISMIR 2005)*.
- Cope D. (1991). *Computers and musical style*. Madison.
- Couprie P. (2010). Utilisations avancées du logiciel iAnalyse pour l'analyse musicale. In *Journées d'informatique musicale (JIM 2010)*.
- Crawford T., Iliopoulos C., Raman R. (1998). String matching techniques for musical similarity and melodic recognition. *Computing in Musicology*, vol. 11, p. 71–100.
- Cuthbert M. S., Ariza C. (2010). music21: A toolkit for computer-aided musicology and symbolic music data. In *International society for music information retrieval conference (ISMIR 2010)*.

- Czerny C. (1848). *School of practical composition*. London.
- David L., Giraud M., Groult R., Levé F., Louboutin C. (2014). Vers une analyse automatique des formes sonates. In *Journées d'informatique musicale (JIM 2014)*.
- Deliège C. (2005). *Sources et ressources d'analyses musicales*. Mardaga.
- Deutsch D. (Ed.). (1982). *The psychology of music*. Academic Press.
- Downie J. (2008). The music information retrieval evaluation exchange (2005-2007): A window into music information retrieval research. *Acoustical Science and Technology*, vol. 29, n° 4, p. 247–255.
- Eerola T., Toivainen P. (2004). MIR in Matlab: the MIDI toolbox. In *International conference on music information retrieval (ISMIR 2004)*.
- Giraud M., Cambouropoulos E. (2013). Fragmentations with pitch, rhythm and parallelism constraints for variation matching. In *International symposium on computer music and multidisciplinary research (CMMR 2013)*.
- Giraud M., Groult R., Leguy E., Levé F. (2015, sous presse). Computational fugue analysis. *Computer Music Journal*, vol. 39, n° 2.
- Giraud M., Levé F., Mercier F., Rigaudière M., Thorez D. (2014). Modeling texture in symbolic data. In *International society for music information retrieval conference (ISMIR 2014)*.
- Gusfield D. (1997). *Algorithms on Strings, Trees, and Sequences*. Cambridge University Press.
- Hamanaka M., Hirata K., Tojo S. (2007). FATTA: Full automatic time-span tree analyzer. In *International computer music conference (ICMC 2007)*.
- Hamanaka M., Tojo S. (2009). Interactive GTTM analyzer. In *International society for music information retrieval conference (ISMIR 2009)*, p. 291–296.
- Hepokoski J., Warren D. (2006). *Elements of sonata theory: Norms, types, and deformations in the late-eighteenth-century sonata*. Oxford University Press.
- Holtzman S. R. (1977). A program for key determination. *Interface*, vol. 6, p. 29–56.
- Hsu J. L., Liu C. C., Chen A. (1998). Efficient repeating pattern finding in music databases. In *International conference on information and knowledge management (CIKM 1998)*.
- Huron D. (1989). Characterizing musical textures. In *International computer music conference (ICMC)*, p. 131–134.
- Huron D. (2002). Music information processing using the Humdrum toolkit: Concepts, examples, and lessons. *Computer Music Journal*, vol. 26, n° 2, p. 11–26.
- Illescas P. R., Rizo D., Iñesta J. M. (2007). Harmonic, melodic, and functional automatic analysis. In *International computer music conference (ICMC 2007)*, p. 165–168.
- Janin D. (2012). Vers une modélisation combinatoire des structures rythmiques simples de la musique. *Revue Francophone d'Informatique Musicale*, vol. 2.
- Krumhansl C. L., Kessler E. J. (1982). Tracing the dynamic changes in perceived tonal organisation in a spatial representation of musical keys. *Psychological Review*, vol. 89, n° 2, p. 334–368.
- Lartillot O. (2002). Kanthume: un projet d'analyse analogique suivant un modèle cognitif d'induction. In *2ème colloque international d'épistémologie musicale*.

- Lartillot O. (2007). Motivic pattern extraction in symbolic domain. In *Intelligent music information systems: Tools and methodologies*. IGI Global.
- Lerdahl F., Krumhansl C. L. (2007). Modeling tonal tension. *Music Perception*, vol. 24, n° 4, p. 329–366.
- Lerdahl F., Jackendoff R. (1983). *A generative theory of tonal music*. MIT Press.
- Madsen S. T., Widmer G. (2007). Key-finding with interval profiles. In *International computer music conference (ICMC 2007)*.
- Marsden A. (2009). “What was the question?”: music analysis and the computer. In *Modern methods for musicology*, p. 137–147. Crawford, Gibson (eds.), Farnham: Ashgate.
- Marsden A. (2010). Schenkerian analysis by computer. *Journal of New Music Research*, vol. 39, n° 3, p. 269–289.
- Marx A. B. (1838, 1845). *Die Lehre von der musikalischen Komposition (volumes 2 et 3)*. Breitkopf & Härtel, Leipzig.
- Meek C., Birmingham W. P. (2003). Automatic thematic extractor. *Journal of Intelligent Information Systems*, vol. 21, n° 1, p. 9–33.
- Mesnage M. (1993). Morphoscope, a computer system for music analysis. *Journal of New Music Research*, vol. 22, n° 2, p. 119–131.
- Mesnage M., Riotte A. (2006). *Formalismes et modèles musicaux (volumes 1 et 2)*. Musique/Sciences, Delatour.
- Mongeau M., Sankoff D. (1990). Comparison of musical sequences. *Computers and the Humanities*, vol. 24, n° 3, p. 161–175.
- Nattiez J. (1975). *Fondements d'une sémiologie de la musique*. Dufrenne.
- Nordgren Q. R. (1960). A measure of textural patterns and strengths. *Journal of Music Theory*, vol. 4, n° 1, p. 19–31.
- Pardo B., Birmingham W. P. (2002). Algorithms for chordal analysis. *Comput Music Journal*, vol. 26, n° 2, p. 27–49. <http://dx.doi.org/10.1162/014892602760137167>
- Passos A., Sampaio M., Kröger P., Cidra G. de. (2009). Functional harmonic analysis and computational musicology in rameau. In *Brazilian symposium on computer music (SBCM 2009)*, p. 207–210.
- Rafailidis D., Nanopoulos A., Manolopoulos Y., Cambouropoulos E. (2008). Detection of stream segments in symbolic musical data. In *International conference on music information retrieval (ISMIR 2008)*.
- Rigaudière M. (2009). *La théorie musicale germanique du XIXe siècle et l'idée de cohérence*. Société Française de Musicologie.
- Rigaudière M. (2012). La Formenlehre au XIXe siècle : de l'observation des modèles à la pratique compositionnelle. In M.-N. Masson (Ed.), *L'interprétation musicale, EuroMAC*, p. 51–65. Delatour.
- Robine M., Rocher T., Hanna P. (2008). Improvements of key-finding methods. In *International computer music conference (ICMC 2008)*.
- Rosen C. (1980). *Sonata forms*. W. W. Norton.

- Sargent G., Bimbot F., Vincent E. (2011). A regularity-constrained Viterbi algorithm and its application to the structural segmentation of songs. In *International society for music information retrieval conference (ISMIR 2011)*.
- Schenker H. (1935). *Der freie Satz*. Universal Edition.
- Temperley D. (1999). What's key for key ? the Krumhansl-Schmuckler key-finding algorithm reconsidered. *Music Perception*, vol. 17, n° 1, p. 65–100.
- Temperley D. (2001). *The cognition of basic musical structures*. The MIT Press.
- Temperley D. (2007). *Music and probability*. The MIT Press.
- Toussaint G. (2010). Computational geometric aspects of rhythm, melody, and voice-leading. *Computational Geometry*, vol. 43, n° 1, p. 2–22.
- Tymoczko D. (2011). *A geometry of music*. Oxford University Press.
- Typke R. (2007). *Music retrieval based on melodic similarity*. Unpublished doctoral dissertation, Univ. Utrecht.
- Ukkonen E., Lemström K., Mäkinen V. (2003). Geometric algorithms for transposition invariant content based music retrieval. In *International conference on music information retrieval (ISMIR 2003)*, p. 193–199.
- Volk A., Wiering F., Kranenburg P. van. (2011). Unfolding the potential of computational musicology. In *International conference on informatics and semiotics in organisations (ICIS 2011)*, p. 137–144.
- Weng P.-H., Chen A. L. P. (2005). Automatic musical form analysis. In *International conference on digital archive technologies (ICDAT 2005)*.

Reçu le 13/11/2013
Accepté le 2/11/2014